
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.41.05.003>

УДК 004.94

Т.А. Марусенкова, канд. техн. наук
Національний університет «Львівська політехніка»
(Україна, 79013, Львів, вул. Степана Бандери, 28а,
тел. +38 (032) 258 25 78; e-mail: tetyana.marus@gmail.com)

Імітаційні моделі синтезу шумів MEMS гіроскопів

Розроблено математичні моделі та програмне забезпечення імітаційного моделювання шумових параметрів MEMS гіроскопів. Наведено два алгоритми синтезу шумів MEMS гіроскопів: через інтегрування псевдовипадкових гармонічних сигналів та за допомогою частотної корекції масиву псевдовипадкових сигналів. Аналіз спектральної характеристики синтезованого шуму проведено за допомогою графіків Алана. Експериментальне дослідження шумів здійснено з використанням розробленого програмно-апаратного комплексу IMU Tester, основою якого є модуль M5Stack з SoC ESP32. Отримані результати мають важливе значення для імітаційного моделювання похибок на основі методу Монте-Карло, оптимізації коректувальних фільтрів Калмана та програмних кодів вбудованих систем інтегрованих IMU сенсорів.

Ключові слова: MEMS гіроскоп, шум, модель синтезу шумів, інерційний вимірювальний пристрій.

Складність розроблення алгоритмів мінімізації похибок вимірювання шляхом компенсації дрейфу функції перетворення на основі методів цифрового фільтрування зумовлює актуальність розроблення математичних моделей та програмного забезпечення імітаційного моделювання шумових параметрів MEMS гіроскопів. Гіроскопи MEMS та акселерометри є основою інтегрованих інерційних вимірювальних пристроїв ((IMU) Inertial Measurement Unit) [1], які широко застосовуються в системах просторової навігації, зокрема в авіоніці [2], автомобільній електроніці [3], пристроях віртуальної реальності, реабілітації, медицини тощо [4]. Розвиток цього напрямку сенсорики належить до концепцій Intelligent Sensor [5] та Sensor Fusion [6].

Крім гіроскопів та акселерометрів до складу систем просторової навігації входять магнітометри [7], сенсори атмосферного тиску та спеціалізовані мікропроцесори [8]. Такі системи просторової навігації застосовуються в смартфонах [9]. Розробка пристроїв на основі MEMS IMU

© Марусенкова Т.А., 2019

сенсорів безпосередньо пов'язана з задачами аналізу їхніх похибок вимірювання та шумів [10, 11], калібрування [12], компенсації дрейфу функції перетворення [13] тощо.

Вирішення цих задач базовано на математичних моделях стохастичних процесів та апаратно-програмних засобах досліджень шуму [14]. Використовуючи отримані в ході досліджень дані, встановлюють механізми та колір шуму [15] та розробляють спеціалізовані методи адаптивного фільтрування сигналів [16]. Найбільше розповсюдження отримали різноманітні модифікації методу варіації Алана для дослідження шумових складових [17, 18] та адаптивного фільтрування на основі фільтра Калмана [19, 20].

Для створення математичних моделей IMU сенсорів, на основі яких проводять імітаційні дослідження точності визначення траєкторії руху, розроблено алгоритми та програмне забезпечення синтезу шумів MEMS гіроскопів.

Постановка задачі. Розглянемо задачу розроблення інтегрованого середовища MIS-IDE (Measurement Inertial System Integrated Development Environment), призначеного для підвищення ефективності процесу синтезу програмних кодів вбудованих систем на основі інтегрованих IMU сенсорів. Зокрема, на даному етапі вирішувалися задачі, пов'язані з розробленням моделей імітаційного генерування сигналів IMU сенсорів за заданим сценарієм руху; апаратно- програмних засобів для тестування IMU сенсорів; алгоритмів параметричного аналізу та синтезу моделей IMU сенсорів; математичних моделей синтезу шумів та похибок вимірювання; алгоритмів оптимізації вибору режимів вимірювання; програмних продуктів мікропроцесорів вбудованих систем IMU сенсорів.

На рис. 1 подано результат імітаційного моделювання точності визначення траєкторії руху з використанням математичних моделей IMU сенсорів. Наведено чотири типові результати: #1 — низький рівень шумів та відсутність систематичної похибки; #2 — низький рівень шумів та незначна систематична похибка; #3 — значний рівень шумів та незначна систематична похибка; #4 — значний рівень шумів та значна систематична похибка. Рівні шумів та систематичних похибок в MEMS гіроскопах та акселерометрах IMU сенсорів є комплексними та багатофакторними [21].

Основними шумовими компонентами у гіроскопах є шум квантування, білий шум, випадкове блукання (дрейф) кута, нестабільність зміщення нуля, мультиплікативна систематична похибка та синусоїдальний шум. Крім зазначених шумів при розробці систем просторової навігації необхідно також враховувати ряд інших артефактів, які обумовлені паразитним впливом зовнішніх умов. У дронах, квадрокоптерах чи гіростабілізованих платформах (наприклад, Segway) таким характерним паразит-

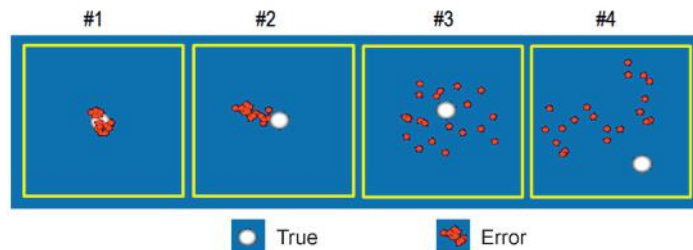


Рис. 1. Результат імітаційного моделювання точності визначення траєкторії руху з використанням математичних моделей ІМУ сенсорів: true — ідеалізований варіант розрахунку просторового положення сенсора; error — варіант з наявністю шумів та завад

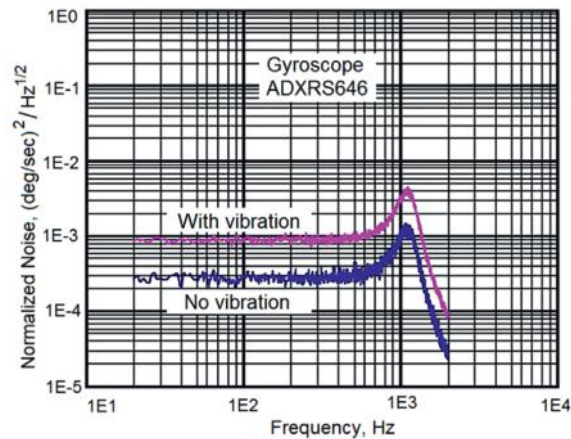


Рис. 2. Криві частотної залежності нормалізованого шуму гіроскопу ADXR646 за відсутності (No vibration) та наявності (With vibration) вібрації [21]

ним впливом є обумовлена двигунами вібрація. Характерний приклад частотної залежності нормалізованого шуму гіроскопа ADXR646 за відсутності та наявності вібрації наведено на рис. 2.

Як зазначено вище, розробка пристроїв на основі інтегрованих ІМУ сенсорів безпосередньо пов'язана з задачами аналізу похибок їхнього вимірювання, періодичного калібрування, компенсації дрейфу функції перетворення, фільтрування сигналів тощо. Вирішення цих задач базовано на математичних моделях стохастичних процесів та апаратно-програмних засобах досліджень шуму. Оптимізацію процесів фільтрування та алгоритму розрахунку просторових координат за масивами даних інтегрованих ІМУ сенсорів проводять за допомогою імітаційних моделей руху. Використовуючи ці моделі, встановлюють закономірності похибок вимі-

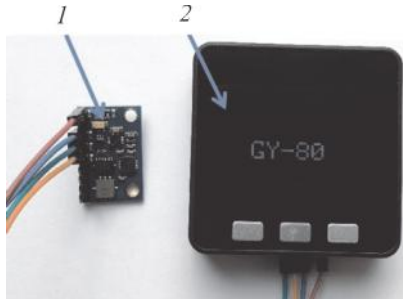


Рис. 3. IMU тестер на основі інтегрованої системи M5Stack: 1 — досліджуваний IMU сенсор; 2 — модуль M5Stack

рювання від параметрів інтегрованих IMU сенсорів, особливостей амплітудно-частотної характеристики шуму та режимів вимірювання.

В основі математичного моделювання лежить метод Монте-Карло, за допомогою якого та з використанням імітаційних моделей руху розраховують масиви ймовірних траєкторій руху. Відтак, для реалізації імітаційного моделювання з використанням методу Монте-Карло необхідно генерувати масиви шумів інтегрованих IMU сенсорів з урахуванням рожевого шуму (фліккер-шуму), випадкового блукання кута, випадкового блукання швидкості та паразитних вібрацій.

Експериментальні дослідження шумів. Для отримання вихідних даних математичних моделей та специфікації їхніх параметрів необхідні результати натурних досліджень. Такі дослідження було проведено з використанням розробленого IMU тестера на основі інтегрованої системи M5Stack [22] (рис. 3). Система реалізована на SoC ESP32 з двоядерним мікропроцесором Xtensa dual-core 32-bit LX6 600 DMIPS, співпроцесором та вбудованими вузлами безпроводного зв'язку Wi-Fi, Bluetooth, BLE.

На рис. 4 наведено вікна програмного забезпечення IMU Tester, який надає можливість конфігурування режимів роботи та вимірювання сигналів MEMS сенсорів — акселерометрів, гіроскопів та магнітометрів інтегрованих інерційних вимірювальних пристроїв IMU. Передбачено широкий набір оброблення сигналів, зокрема калібрування сенсорів, аналіз параметрів руху, шуму, часового дрейфу тощо.

Приклад сигналу кутової швидкості (Angular velocity [degree/sec]) нерухомого гіроскопа L3G4200D без паразитної вібрації та результати розрахунку похибки кута повороту (Angular rotation) для даного рівня шуму наведено на рис. 5. По осі абсцис відкладено номер вимірювання (Sampling number) або час вимірювання (Time). У даному випадку виконувалося вимірювання 1000 значень сигналу, що відповідає приблизно 10 с. Вимірювальний канал гіроскопа (в даному прикладі — вимірювання кута повороту навколо координатної осі X) у процесі досліджень сконфігурований так: діапазон вимірювання кутового прискорення — Range = 250 DPS (degrees per second), швидкість вимірювального перетворення — RATE = 100 Hz, ширина смуги частот — BAND BW = 12 Hz. Попередньо вимірювальний канал було відкалібровано. Зокрема, на рис. 5, б, вказано



Рис. 4. Фрагменти вікон програмного забезпечення IMU Tester (з екрану)

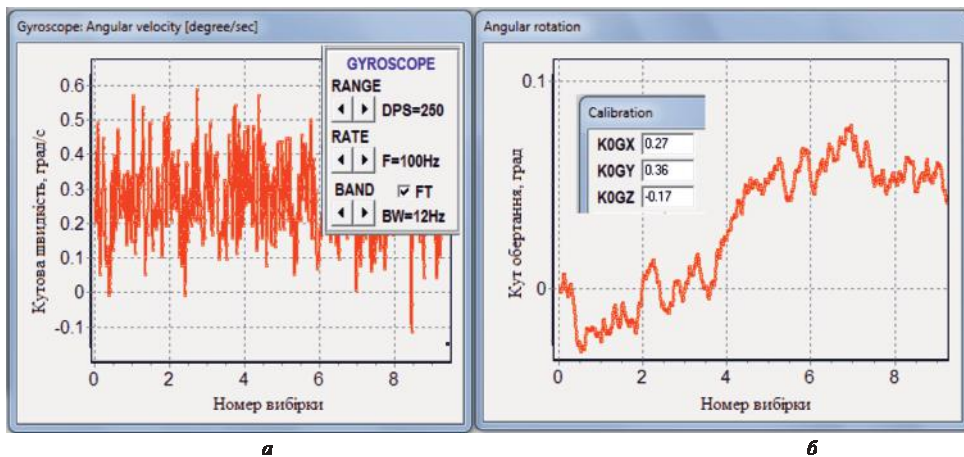


Рис. 5. Результати вимірювання шуму гіроскопа без паразитної вібрації (а) та крива розрахунку похибки кута повороту для даного шуму (б)

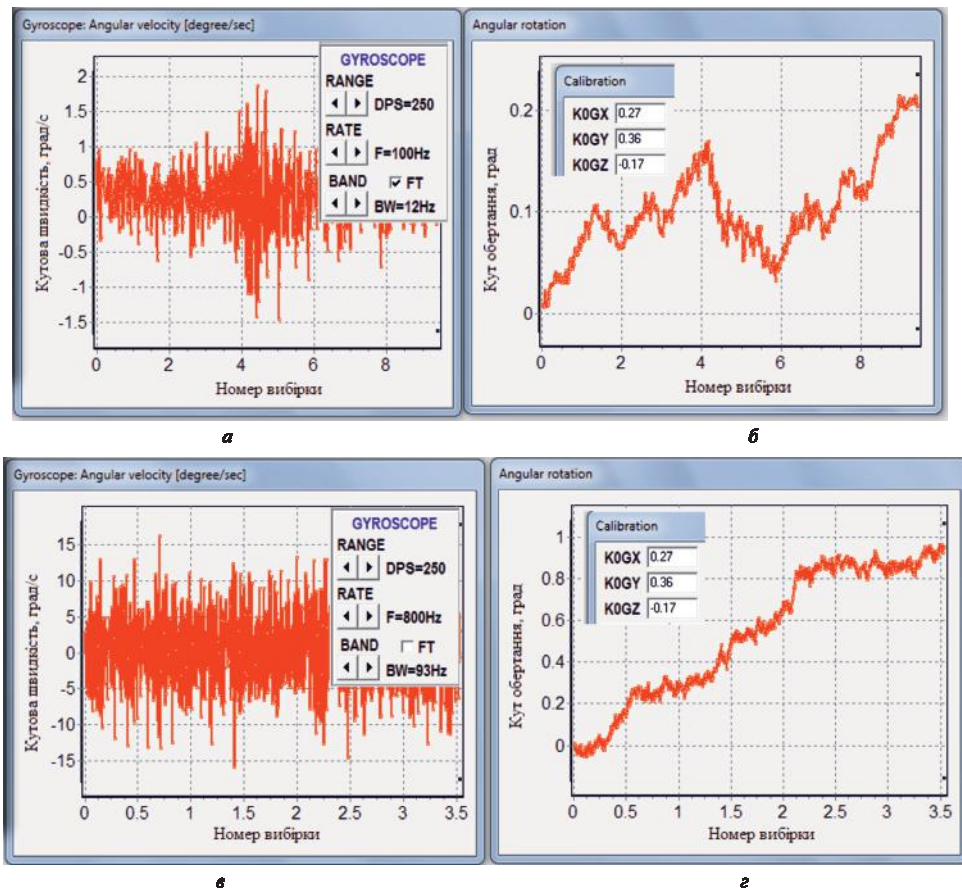


Рис. 6. Результати вимірювання шуму за наявності незначного (а) і значного (в) рівня паразитної вібрації та крива розрахунку похибки кута повороту для незначної (б) і значної (г) вібрації

значення зміщень (off-set) вимірювальних каналів по осях X, Y, Z — $K0GX, K0GY, K0GZ$. Для наведеного прикладу шумової доріжки гіроскопу без вібрації дрейф кута повороту не перевищує значення 0,08 кут. град.

Аналогічні вимірювання проведено за наявності низькочастотної паразитної вібрації з незначним та значним рівнями (рис. 6). Для наочності амплітуда вібрації в часі дещо змінювалася. Можна бачити, що незначна паразитна вібрація обумовлює збільшення рівня шуму та наростання систематичної похибки приблизно 0,2 кут. град. за 10 с вимірювання (рис. 6, а, б). Натомість, при значній паразитній вібрації (вимірювання проводилося зі збільшеною швидкістю вимірювального перетворення $RATE = 800 \text{ Hz}$)

наростання систематичної похибки становить приблизно 1 кут. град. за 3,5 с вимірювання (рис. 6, в, з).

Після цього будують графіки Алана, за формою яких встановлюють спектральні характеристики шуму та інші характеристики нестабільності процесу вимірювання. Приклад розрахунку графіку Алана наведено на рис. 7. Як бачимо, форма графіка є суттєво спотвореною, що пояснюється впливом паразитної вібрації.

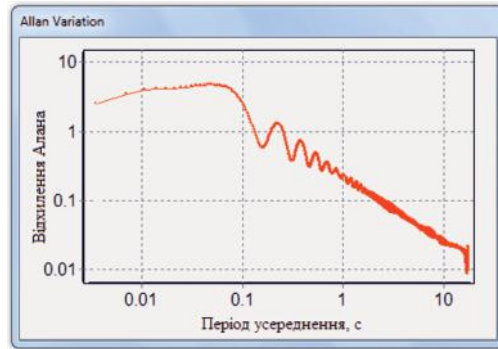


Рис. 7. Графік Алана за результатами експериментальних досліджень

Дані приклади мають лише ілюстративний характер, не претендують на встановлення кількісних параметрів нестабільності досліджуваних гіроскопів та використовуються, зокрема, для підтвердження важливості врахування вібрацій у процесі імітаційного моделювання ІМУ сенсорів та якісної оцінки адекватності синтезованих шумів через співставлення форм графіків Алана цих шумів з результатами експериментальних досліджень.

Алгоритми та математичні моделі синтезу шумів MEMS гіроскопів. Запропоновано декілька алгоритмів синтезу шумів інтегрованих ІМУ сенсорів. Розглянемо два з них.

Алгоритм А1 базовано на інтегруванні псевдовипадкових гармонічних сигналів, алгоритм А2 — на частотній корекції масиву псевдовипадкових сигналів. Вікно програмного забезпечення моделі синтезу шуму на основі алгоритму А1, приклад синтезованого масиву даних, а також гістограма та графік Алана цих даних подано на рис. 8.

Для формування амплітудно-частотної характеристики шуму використовують чотири базові частоти, F_1, F_2, F_3, F_4 , та відповідні їм коефіцієнти K_1, K_2, K_3, K_4 , які вказують на нормовані значення амплітуд гармонічних коливань на зазначених базових частотах. Значення F_1 відповідає низькочастотним складовим шуму, F_2 та F_3 — середньочастотним, а F_4 — високочастотним. Синтез шуму виконується підсумовуванням гармонічних сигналів певного набору частот f_n , логарифмічні значення яких рівномірно розподіляються в діапазоні $F_1 \dots F_4$. Кількість значень набору частот f_n визначається параметром d_f (у вікні програмного забезпечення на рис. 8 цей параметр позначено dF), при цьому $f_{n+1} = f_n d_f, f_1 = F_1, f_4 \approx F_4$.

Передбачено два варіанти синтезу масиву шуму S_N : з фіксацією зсуву фаз φ_n в наборі частот f_n та з генеруванням випадкових значень фаз φ_n . Для формування домінуючої гармоніки шуму, яка може проявлятися в ІМУ

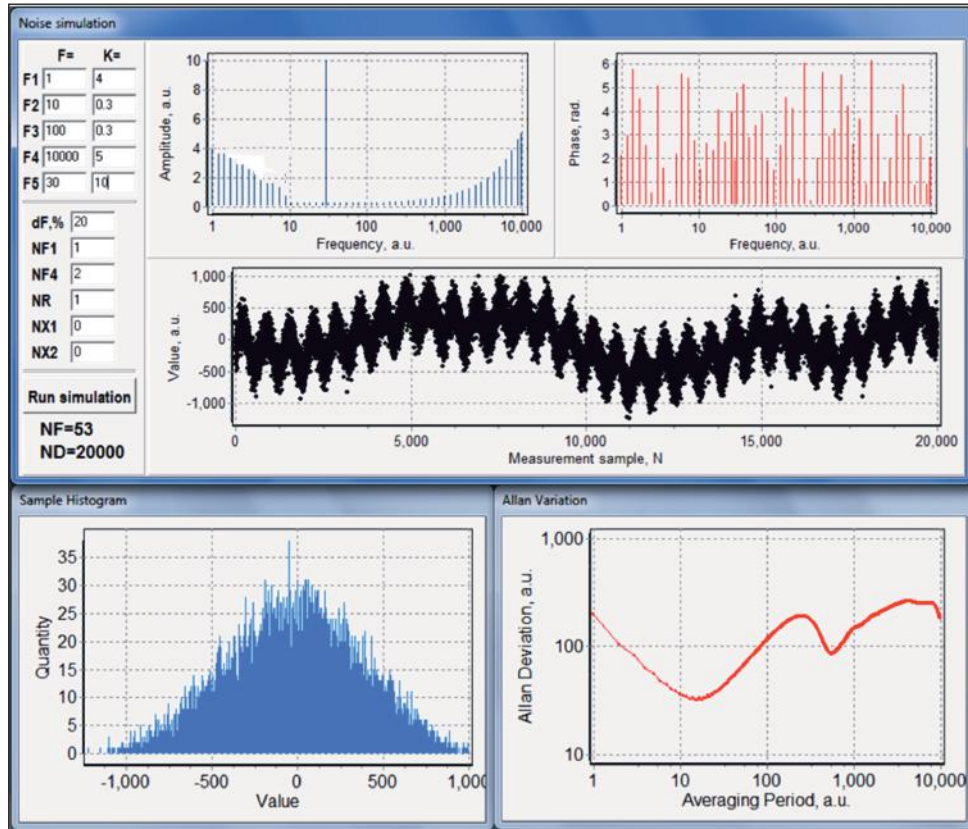


Рис. 8. Вікна програмного забезпечення генерування та аналізу шуму (варіант результатів при паразитній вібрації $K(F_5) = 10$) (з екрану)

сенсорах внаслідок власної частоти коливання MEMS структури чи зовнішньої паразитної вібрації, використовують значення частоти F_5 та відповідного їй коефіцієнта K_5 .

У відповідності до запропонованого алгоритму синтезу шуму на першому етапі виконують розрахунок апроксимаційної функції k , яка визначається чотирма зазначеними базовими частотами та коефіцієнтами: $k(F_1) = K_1$, $k(F_2) = K_2$, $k(F_3) = K_3$, $k(F_4) = K_4$.

На другому етапі проводять розрахунок набору частот f_n , густина розподілу яких в діапазоні $F_1 \dots F_4$ відповідає умові $f_{n+1} = f_n d_f$.

На третьому етапі розраховують нормовані значення масиву часових інтервалів t_k , в яких проводять синтез вибірок шуму $S_N(t_k)$. Значення часових інтервалів відповідають умові $t_{k+1} = t_k + dt$, де dt — кількість вибірок N_4 за період T_4 на найвищій частоті F_4 .

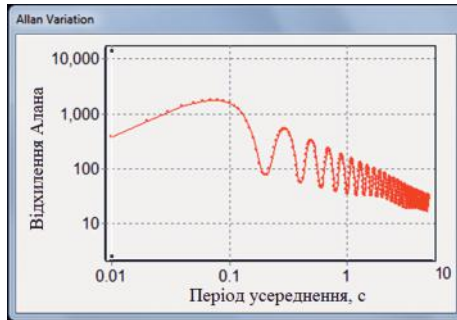


Рис. 12. Графік Алана для масиву синтезованого шуму MEMS гіроскопу за наявності паразитної вібрації

Реалізація моделі синтезу шуму на основі алгоритму A2 базується на частотній корекції масиву псевдовипадкових сигналів. Такий алгоритм можна реалізувати з використанням програмних засобів схемного моделювання, зокрема MICRO-CAP [23]. Використовується макромодель шуму NF на основі функціонального джерела (Function Source) формульного типу або частотно-задаючих кіл. В макромоделі шуму формульного типу застосовано алгебраїчний вираз для обчислення вихідної змінної як функції довільного набору коректних змінних частотної області. Важливою опцією цього джерела є можливість аналітичного визначення частотної характеристики. При використанні $\langle \text{freq} \rangle$, заданий алгебраїчний вираз обчислюється під час аналізу в режимі малих сигналів (а саме змінного струму) зі зміною частоти. Приклад специфікації такого частотно-залежного джерела шуму (Enoise) та результат аналізу його амплітудно-частотної характеристики наведено на рис. 9. У даному прикладі частотна характеристика визначається аналітичним виразом $\text{FREQ} = 1/\sqrt{f} + f/60$.

Альтернативний спосіб синтезу шумів з заданими амплітудно-частотними характеристиками оснований на синтезі частотно-задаючих електричних кіл. Для формування необхідної частотної характеристики використовуються послідовні та паралельні ланки на основі конденсаторів C , індуктивностей L та резисторів R . Приклад схеми такого частотно-задаючого кола та результат модельного дослідження його сигналів наведено на рис. 10.

Завершальним етапом синтезу шумів за допомогою програмних засобів схемного моделювання є транспортування отриманого масиву шуму з пакету MICRO-CAP в інтегроване середовище MIS-IDE. Схематично процес такого транспортування показано на рис. 11. Графік Алана для масиву синтезованого шуму у відповідності до розглянутих параметрів частотно-задаючого кола показано на рис. 12.

Висновки

Апробація на численних прикладах імітаційного моделювання та їх співставлення з результатами експериментальних досліджень свідчить про високу універсальність запропонованих імітаційних моделей синтезу шу-

му MEMS гіроскопів. Їхньою перевагою є можливість синтезу притаманних для MEMS гіроскопів шумів із заданою спектральною характеристикою та паразитними вібраціями. Отримані результати мають важливе значення для імітаційного моделювання похибок вимірювання методом Монте-Карло, оптимізації коректувальних фільтрів Калмана та програмних кодів вбудованих систем інтегрованих IMU сенсорів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Höflinger F., Müller J., Zhang R. et al. Wireless microinertial measurement unit (IMU) // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (9), pp. 2583—2595.
2. Blasch E., Kostek P., Paues P., Kramer K. Summary of avionics technologies // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 30 (9), pp. 6—11.
3. Ahmed H., Tahir M. Accurate attitude estimation of a moving land vehicle using low-cost MEMS IMU sensors // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(7), pp. 1723—1739.
4. Buke A., Gaoli F., Yongcai W. et al. Healthcare algorithms by wearable inertial sensors: a survey // China Communications, 2015, 12 (4), pp. 1—12.
5. Nemeš D., Janota A., Hrubos M., Simak V. Intelligent real-time MEMS sensor fusion and calibration // IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (19), pp. 7150—7160.
6. Lima P.U. A Bayesian approach to sensor fusion in autonomous sensor and robot networks // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2007, 10 (3), pp. 22—27.
7. Holyaka R., Marusenkova T. Split Hall Structures: Parametric Analysis and Data Processing. Norderstedt: Lambert Academic Publishing, 2018, 124 p.
8. The five motion senses: using MEMS inertial sensing to transform application. Analog Devices, Inc. 2017, 4p.
9. Shin B., Kim C., Kim J. et al. Motion recognition-based 3D pedestrian navigation system using smartphone // IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (8), pp. 6977—6989.
10. Zekavat R., Buehrer M. Localization sensor error measures and analysis. Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances. John Wiley & Sons, 2019, 1376 p.
11. Daroogheha S., Lasky T., Ravani B. Position measurement under uncertainty using magnetic field sensing // IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (12), N. 4002908.
12. Li Y., Georgy J., Niu X. et al. Autonomous calibration of MEMS gyros in consumer portable devices // IEEE Sensors Journal, 2015, 15 (7), pp. 4062—4072.
13. Latt W., Tan U., Riviere C., Ang W. Transfer function compensation in gyroscope-free inertial measurement units for accurate angular motion sensing // Ibid, 2012, 12 (5), pp. 1207—1208.
14. Huang J., Soong B. Cost-aware stochastic compressive data gathering for wireless sensor networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68, pp. 1525—1533.
15. Shmaliy Y., Zhao S., Ahn C. Optimal and unbiased filtering with colored process noise using state differencing // IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26 (4), pp. 548—551.
16. Lin X., Jiao Y., Zhao D. An improved Gaussian filter for dynamic positioning ships with colored noises and random measurements loss // IEEE Access, 2018, 6, pp. 6620—6629.
17. Allan D., Levine J. A historical perspective on the development of the Allan variances and their strengths and weaknesses // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63 (4), pp. 513—519.
18. Guerrier S., Molinari R., Stebler Y. Theoretical limitations of Allan variance-based regression for time series model estimation // IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23 (5), pp. 597—601.

19. Shao T., Duan Z., Ge Q., Liu H. Recursive performance ranking of Kalman filter with mismatched noise covariances // IET Control Theory & Applications, 2019, 13 (4), pp. 459—466.
20. Won S., Melek W., Golnaraghi F. A Kalman particle filter based position and orientation estimation method using a position sensor/Inertial measurement unit hybrid system // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (5), pp. 1787—1798.
21. High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope. Data Sheet ADXRS646. Analog Devices, Inc. 2017, 12p. Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS646.pdf>.
22. M5Stack Documentation. Режим доступу: <https://media.readthedocs.org/pdf/m5stack/%20master/m5stack.pdf>.
23. MICRO-CAP. Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software. Режим доступу: <http://www.spectrum-soft.com>.

Отримано 16.05.19;
після доопрацювання 11.06.19

REFERENCES

1. Höflinger, F., Müller, J., Zhang, R., Reindl, L. and Burgard, W. (2013), “Wireless micro inertial measurement unit (IMU)”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, Iss. 9, pp. 2583-2595.
2. Blasch, E., Kostek, P., Paces, P. and Kramer, K. (2015), “Summary of avionics technologies”, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 30, Iss. 9, pp. 6-11.
3. Ahmed, H. and Tahir, M. (2017), “Accurate attitude estimation of a moving land vehicle using low-cost MEMS IMU sensors”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, Iss. 7, pp. 1723-1739.
4. Buke, A., Gaoli, F., Yongcai, W., Lei, S. and Zhiqi, Y. (2015), “Healthcare algorithms by wearable inertial sensors: a survey”, *China Communications*, Vol. 12, Iss. 4, pp. 1-12.
5. Nemeč, D., Janota, A., Hrubos, M. and Simak, V. (2016), “Intelligent real-time MEMS sensor fusion and calibration”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, Iss. 19, pp. 7150-7160.
6. Lima, P.U. (2007), “A Bayesian approach to sensor fusion in autonomous sensor and robot networks”, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 10, Iss. 3, pp. 22-27.
7. Holyaka, R. and Marusenkova, T. (2018), Split Hall Structures: Parametric Analysis and Data Processing, Lambert Academic Publishing, Norderstedt, Germany.
8. (2017), The five motion senses: using MEMS inertial sensing to transform application, Analog Devices.
9. Shin, B., Kim, C., Kim, J., Lee, S., Kee, C., Kim, H. and Lee, T. (2016), “Motion recognition-based 3D pedestrian navigation system using smartphone”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, Iss. 8, pp. 6977-6989.
10. Zekavat, R. and Buehrer, M. (2019), Localization sensor error measures and analysis. Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances, John Wiley & Sons.
11. Daroogheha, S., Lasky, T. and Ravani, B. (2018), “Position measurement under uncertainty using magnetic field sensing”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, Iss.12, no. 4002908.
12. Li, Y., Georgy, J., Niu, X, Li, Q. and El-Sheimy, N. (2015), “Autonomous calibration of MEMS gyros in consumer portable devices”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, Iss. 7, pp. 4062-4072.
13. Latt, W., Tan, U., Riviere, C. and Ang, W. (2012), “Transfer function compensation in gyroscope-free inertial measurement units for accurate angular motion sensing”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, Iss. 5, pp. 1207-1208.

14. Huang, J. and Soong, B. (2019), "Cost-aware stochastic compressive data gathering for wireless sensor networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, pp. 1525-1533.
15. Shmaliy, Y., Zhao, S. and Ahn, C. (2019), "Optimal and unbiased filtering with colored process noise using state differencing", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 26, Iss. 4, pp. 548-551.
16. Lin, X., Jiao, Y. and Zhao, D. (2018), "An improved Gaussian filter for dynamic positioning ships with colored noises and random measurements loss", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 6620-6629.
17. Allan, D. and Levine, J. (2016), "A historical perspective on the development of the Allan variances and their strengths and weaknesses", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 63, Iss. 4, pp. 513-519.
18. Guerrier, S., Molinari, R. and Stebler, Y. (2016), "Theoretical limitations of Allan variance-based regression for time series model estimation", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 23, Iss. 5, pp. 597-601.
19. Shao, T., Duan, Z., Ge, Q. and Liu, H. (2019), "Recursive performance ranking of Kalman filter with mismatched noise covariances", *IET Control Theory & Applications*, Vol. 13, Iss. 4, pp. 459-466.
20. Won, S., Melek, W. and Golnaraghi, F. (2010), "A Kalman particle filter based position and orientation estimation method using a position sensor/Inertial measurement unit hybrid system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, Iss. 5, pp. 1787-1798.
21. (2017), High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope. Data Sheet ADXRS646, Analog Device, available at <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS646.pdf> (accessed June 10 2019).
22. (2018), "M5Stack Documentation", available at <https://media.readthedocs.org/pdf/m5stack/master/m5stack.pdf> (accessed April 13 2019).
23. (2014), "MICRO-CAP. Electronic Circuit Analysis Program. Spectrum Software", available at <http://www.spectrum-soft.com> (accessed April 13 2019).

Received 16.05.19;
after revision 11.06.19

Т.А. Марусенкова

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИНТЕЗА ШУМА MEMS ГИРОСКОПОВ

Разработаны математические модели и программное обеспечение имитационного моделирования шумовых параметров MEMS гироскопов. Представлены два алгоритма синтеза шумов MEMS гироскопов: посредством интегрирования псевдослучайных гармонических сигналов и с помощью частотной коррекции массива псевдослучайных сигналов. Анализ спектральной характеристики синтезированного шума проведен с помощью графиков Алана. Экспериментальные исследования шумов выполнены с использованием разработанного на основе M5Stack с SoC ESP32 программно-аппаратного комплекса IMU Tester. Полученные результаты имеют большое значение для имитационного моделирования погрешностей с помощью метода Монте-Карло, оптимизации корректирующих фильтров Калмана и программных кодов встроенных систем интегрированных IMU сенсоров.

К л ю ч е в ы е с л о в а: MEMS гироскоп, шум, модель синтеза шумов, инерциальное измерительное устройство.

Т.А. Marusenkova

SIMULATION MODELS FOR SYNTHESIZING NOISE OF MEMS GYROSCOPES

The work presents a solution to a problem of developing software for modeling noise of MEMS gyroscopes. Such software is of great importance due to complexity of the algorithms for minimization of pose estimation errors by compensation for the transfer function drift based on digital filtering. We have proposed two algorithms for synthesizing noise terms typical of MEMS gyroscopes. The first of these algorithms is based on integrating pseudorandom harmonic signals. The second one assumes frequency correction of an array of pseudorandom signals. The spectral characteristics of synthesized noise are analyzed using the Allan variance. We use our own software, IMU tester, based on M5Stack with SoC ESP32, to study noise parameters. The obtained results are of key importance for simulation of MEMS gyroscopes errors using the Monte-Carlo method, optimization of the correcting Kalman-based filters and firmware of integrated IMU sensors.

Key words: MEMS gyroscope, noise, model of noise synthesis, inertial measurement unit.

МАРУСЕНКОВА Тетяна Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення Національного університету «Львівська політехніка», який закінчила у 2005 р. Область наукових досліджень — математичне моделювання, інерційні сенсори, вбудоване програмне забезпечення.